فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۲۰، شماره ۷۷، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۴۵-۵۹

بررسی پتروفیزیکی، ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری در سازند ایلام یکی از میادین جنوب غرب ایران

حامد امرایی[۱و*]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

بررسی ویژگی‌های مخزنی و مکانیکی سازندها ازجمله محاسبه تراوایی، زون‌بندی مخزن و ساخت مدل ژئومکانیکی از الزامات مطالعات مهندسی نفت در تمامی شاخه‌ها است. با توجه به اهمیت علوم زمین‌شناسی، چاه‌پیمایی و ژئومکانیک مخزن در مطالعات مهندسی نفت، پژوهش حاضر با هدف انجام مطالعه‌ای جامع به زون‌بندی سازند از تلفیق زمین‌شناسی و پتروفیزیک، محاسبه تراوایی از نمودار صوتی دوقطبی برشی و درنهایت ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی برای سازند ایلام چاه موردمطالعه می‌پردازد. به این منظور، در مرحله اول به کمک مجموعه کامل نمودارهای چاه‌پیمایی و تلفیق با اطلاعات زمین‌شناسی، مخزن موردمطالعه به چهار زون و بخش تفکیک شد. در مرحله دوم با عنایت بر دقت بسیار بالای موج استونلی در تخمین تراوایی، از روش شاخص زون جریانی- استونلی برای محاسبه این پارامتر حساس بهره گرفته شد. ضریب همبستگی تراوایی تخمین زده‌شده با تراوایی مغزه در روش شاخص زون جریانی-استونلی (R^2=۰/۹۰) به دست آمد. در مرحله سوم برای بازه اصلی مخزن موردمطالعه مدل ژئومکانیک یک‌بعدی ساخته شد. بر همین اساس جهت تنش حداقل و حداکثر در چاه موردمطالعه به ترتیب S34E و N56E به دست آمد. بر مبنای مدل ساخته‌شده، بازه‌های دارای Breakout با نتایج مدل مطابقت دارد و وزن گل اعمال‌شده در این چاه کمی کمتر از پنجره ایمن گل و منطبق با فشار منفذی است. پنجره ایمن گل برای حالت قائم در زون مورد بررسی بین ۱۲/۲ تا ۱۵/۵ (LB/G)، آزیموت بهینه از راستای عمودی با آزیموت N120 درجه و انحراف ۸۰-۹۰ درجه است. حداقل وزن بهینه در این راستا بر اساس فشار و وزن گل معادل آن به ترتیب ۵۹۹۶/۷ (psi) و ۱۱/۸ (LB/G) محاسبه و رژیم گسلش در چاه موردمطالعه، با توجه به مقادیر تنش‌های افقی و عمودی از نوع نرمال-امتدادلغز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تراوایی، زون‌بندی مخزن، موج استونلی، مدل ژئومکانیکی

* نویسنده مرتبط: hamedamraei0@gmail.com

مقدمه

محاسبه پارامترهای مخزنی، شناخت و زون‌بندی مخزن، ساخت مدل ژئومکانیکی و تحلیل پایداری چاه نقشی حیاتی در انجام ایمن و اقتصادی تولید هیدروکربور و ذخیره‌سازی زیرزمینی آن دارد و بی‌توجهی به مطالعات و بررسی‌های ژئومکانیکی باعث میلیون‌ها دلار هزینه اضافی در عملیات حفاری و فجایعی نظیر مچالگی لوله جداری و فشردگی مخزن می‌شود (Zoback et al., 1985). درحالی‌که با اندک مطالعه‌ای می‌توان هزینه‌ها را مدیریت کرد. از طرفی هزینه‌هایی که شاید در کوتاه‌مدت دیده نشوند وجود دارند اما بی‌شک در طول عمر میدان، خود را نشان می‌دهند. ضرر این هزینه‌ها بسیار کلان خواهد بود و تنها فقط با یک نگاه بلندمدت به مدیریت مخزن می‌توان آن‌ها را کنترل کرد. امروزه مطالعات ژئومکانیکی موضوعی حیاتی در صنعت نفت و گاز محسوب می‌شود. مدل ژئومکانیکی نمایش عددی پیوسته‌ای از تغییرات ویژگی‌های مکانیکی سنگ، وضعیت تنش‌ها و فشار منفذی است. بهره‌گیری از مدل ژئومکانیکی به‌منظور پایداری چاه و بررسی فنی مخازن حائز اهمیت فراوان است. برای ساخت مدل ژئومکانیکی از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی استفاده‌شده و با استفاده از داده مغزه و آزمایش‌های درون‌چاهی کالیبره می‌شود. همچنین تولید بهینه، توسعه اصولی و بهره‌برداری صحیح از یک مخزن نفتی یا گازی نیازمند شناخت دقیق و درست درست ویژگی‌های پایه‌ای مخزن ازجمله تراوایی و تخلخل است. تراوایی نسبت میزان فضای خالی سنگ به کل سنگ است که اجازه حرکت سیال داخل سنگ را می‌دهد (توکلی، ۱۳۹۹ و رضایی و چهرازی، ۱۳۸۹). محاسبه و تخمین پارامتر تراوایی در تمام طول عمر یک مخزن برای شناخت ویژگی‌های مخزن، تعیین محل بهینه برای حفاری چاه‌های توسعه‌ای، استفاده از روش‌های درست ازدیاد برداشت، پیش‌بینی میزان تولید، ساخت مدل‌های استاتیک/داینامیک و ... بسیار حیاتی است. با تخمین دقیق تراوایی می‌توان میزان قابلیت حرکت سیال در خلل و فرج سنگ را مشخص کرد (Soleimani et al., 2018). با توجه به اینکه پارامتر بیان‌شده از پیچیده‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی در ارزیابی ویژگی‌های مربوط به سنگ و سیال است، درنتیجه تخمین دقیق آن کاری دشوار است (Rafik and Kamel, 2017). برای محاسبه و تخمین تراوایی در مخازن هیدروکربنی روش‌های مختلفی چون مغزه‌گیری، چاه‌آزمایی، داده‌های لرزه‌ای، روابط تجربی، نمودارهای چاه‌پیمایی یا تلفیق هر یک از روش‌های بیان‌شده با الگوریتم‌های هوشمند و هوش مصنوعی ارائه‌شده است (Jamalian et al., 2018). چاه‌آزمایی و آنالیز مغزه روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تراوایی‌اند، اما اندازه‌گیری تراوایی از مغزه‌های حفاری در عمل، عملیاتی هزینه‌دار و زمان‌بر است. چاه‌آزمایی نیز به سبب عواملی نظیر هزینه‌های گزاف و توقف تولید در زمان انجام تست‌ها در تمامی چاه‌ها صرفه اقتصادی ندارد. روابط تجربی نیز یکی از روش‌ها برای تخمین تراوایی‌اند که گاهی دقت بالایی دارند اما با توجه به اینکه فقط در آن سازند یا مخزن قابل‌اتکا می‌باشد، قابل بسط به چاه‌های دیگر نیستند و فاقد اعتبار و ارزش لازم می‌باشند (رضایی و چهرازی، ۱۳۸۹). ازاین‌رو با توجه به اهمیت بسیار بالای تخمین تراوایی در صنعت نفت، یافتن روش‌های کم‌هزینه و درعین‌حال دقیق برای تخمین این پارامتر حیاتی به نظر می‌رسد. از طرفی وجود مزایایی نظیر در دسترس بودن، جامع بودن و همچنین هزینه‌های پایین عملیات چاه‌پیمایی به نسبت روش‌های دیگر و اینکه اکثر اوقات در تمامی چاه‌های یک میدان اطلاعات نگاره‌ها در دسترس هستند، باعث شده که توسعه، بهینه‌سازی و به‌کارگیری روش‌هایی مبتنی بر نمودارها برای محاسبه تراوایی گزینه‌ای معقول و اقتصادی‌تر به نظر برسد (توکلی، ۱۳۹۹ و خیر و همکاران، ۱۳۹۴). موج استونلی حاصل از نگاره صوتی دوقطبی برشی[1] در طول سالیان ثابت کرده، ابزاری مفید، کاربردی و دقیق برای تخمین تراوایی مخازن هیدروکربنی است (Soleimani et al., 2018). موج بیان‌شده، دارای خاصیت پراکنده شونده می‌باشد که در سطح تداخل بین سیال و سازند انتشار می‌یابد. تخمین تراوایی از موج استونلی به نسبت روش‌های دیگر در اندازه‌گیری مستقیم تراوایی سازند برتری بالاتری

1. Dipole Shear Sonic Imager

دارد. تأثیر کندشدگی موج استونلی تابعی از بسامد می‌باشد، به‌نحوی‌کـــه افزایش تراوایی موجب افزایش تضعیف دامنه و کندشـــدگی این موج می‌شـــود (Al-Adani and Barati، 2003). در فرکانس‌های پایین موج بیان‌شـــده به شکل یک موج لوله‌ای درون چاه منتشر می‌شود و زمانی که چاه از یک ناحیه دارای شکستگی یا تراوا بگذرد، همین موجب کاهش مقدار زیادی از انرژی شـــده اســـت و درنهایت باعث میرایی موج استونلی و بالا رفتن مقدار کندشدگی آن می‌شود. بری و همکاران (Brie et al., 1998)، رابطه‌ای ارائه دادند که به کمک آن می‌شد مقدار کندشدگی موج استونلی را ارائه داد. محی‌الدین و همکاران (Mohiuddin et al., 2001)، برای بررسی و تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین پنجره ایمن گل حفاری به ساخت مدل ژئومکانیکی پرداختند. الادنی و براتی (Al-Adani and Barati، 2003)، به بررسی اثرات تراوایی بر کندشدگی موج استونلی پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد، شاخص تراوایی اندازه‌گیری مستقیمی از شاخص زون جریان[1] اســـت و کندشدگی موج استونلی در سرتاسر چاه به یک کندشدگی زمینه‌ای مربوط به یک ناحیه ناتراوا در چاه و یک کندشدگی مربوط به ناحیه تراوای سازند تقسیم می‌شود. آبعلـــی اوغلو و همکاران (Abalioglu et al., 2011)، برای پیش‌بینی ناپایداری‌های دیواره چاه از مدل ژئومکانیکی بهره گرفتنـــد. رافیک و کامـــل (Rafik and Kamel، 2017)، به تخمیـــن تراوایـــی از نمودارهای چاه‌پیمایـــی به کمک روش خوشـــه‌بندی چند تفکیکی بر پایـــه گراف[2] پرداختند. ســـلیمانی و همـــکاران (Soleimani et al., 2018)، برای مخازن گروه بنگســـتان میدان منصوری به تشخیص انواع رخساره‌های ســـنگی و تخمین تراوایی به کمک موج اســـتونلی پرداختند. نتایج بررسی‌ها گواه همبستگی بالای موج استونلی در تخمین تراوایی با تراوایی مغزه است. عزتی و همـــکاران (Ezati et al., 2020)، به تحلیل پایداری چاه با اســـتفاده از مدل‌ســـازی ژئومکانیکی پرداختند. در این مطالعه، یـــک تحلیل ژئومکانیکی یک‌بعـــدی برای مخزن کربناته ســـروک در ســـه حلقه چاه یکی از میادین نفتی در دشـــت آبادان در جنوب غربی ایران با محاسبه پارامترهای الاستیک، مقاومتی، فشار منفذی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری انجام شد. خیر و همکاران در سال ۱۳۹۴ به کمک موج استونلی به بهبود روش‌های تعیین پارامترهای محاسبه کمی تراوایی در مخازن کربناته پرداختند. بر مبنای مطالعات انجام‌شده ایشان پارامتر تخلخل بیشترین تأثیر را در تعیین دقیق تراوایی دارد. اعتمادی‌کرمانی و آبدیده در سال ۱۳۹۵ به کمک داده‌های موج اســـتونلی و تراوایی حاصل از آنالیز مغزه به محاسبه تراوایی پرداختند. توکلی در سال ۱۳۹۹ به بررسی تأثیر تراوایی بر کاهش سرعت موج استونلی پرداخت. در این پژوهش به بررســـی شـــاخص‌های زمین‌شناســـی و پتروفیزیکی مؤثر بر ســـرعت موج استونلی در مخازن دالان و کنگان پرداخته شـــد. ســـعادت‌زاده و عصاریان در سال ۱۴۰۱ به تعیین نوع ســـنگ و تخمین تراوایی با به‌کارگیری آنالیز نگارهای چاه‌پیمایی با استفاده از تکنیک‌های شاخص ناحیه جریانی در یک مخزن نفتی واقع در جنوب غرب ایران پرداختند. عمارلو و همکاران (Ammarloo et al., 2025)، به توســـعه یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعـــدی در یک میدان نفتی در جنوب غربی ایـــران پرداختند. بنابراین با توجه به اهمیت علوم زمین‌شناسی، چاه‌پیمایی و ژئومکانیک مخزن در مطالعات مهندســـی نفت، پژوهش حاضر با هدف انجام مطالعه‌ای جامـــع به زون‌بندی مخزن موردمطالعه از تلفیق زمین‌شناسی و پتروفیزیک، محاسبه تراوایی از نمودار صوتی دوقطبی برشی و درنهایت ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی پرداخته شد.

منطقه مورد پژوهش و داده‌های در دسترس

میدان نفتی موردمطالعه در پهنه دشـــت آبادان در پی برداشـــت‌های لرزه‌نگاری دوبعدی کشف شـــد. این میدان دارای ســـاختمانی با شـــیب ملایم و مســـاحتی در حدود ۲۲۰ کیلومترمربع اســـت. ســـاختار میدان بیان‌شده حاوی چندین مخزن کرتاســـه شامل ســـازندهای ایلام، سروک و فهلیان اســـت که سازند ایلام مخزن اصلی تولیدکننده نفت آن می‌باشـــد (James and Wynd، 1965). ســـازند ایلام در چاه موردمطالعه با ضخامت ۱۱۵ متر متشـــکل از سنگ آهک‌های توده‌ای، متوســـط تا ضخیم با میان لایه‌هایی از

1. Flow Zone Indicator
2. Multi- resolution Graph- based Clustering

شیل و اندکی دولومیت تشـــکیل و با ناپیوستگی هم‌شیب روی سازند سروک قرار دارد و مرز بالایی آن با سازند گورپی پیوســـته است. بر مبنای شواهد ژئوشیمیایی و مطالعه‌های انجام گرفته در پهنه مورد پژوهش، شاید نفت این سازند از سنگ منشأهای سرگلو با سن باژوسین-باتونین و گرو با سن بریازین-سنومانین تغذیه شود (James and Wynd, 1965). برای انجام این مطالعه از داده‌های مجموعه کامل نمودارهای چاه‌پیمایی معمول، نمودار تصویرگر FMI، موج اســـتونلی، داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه و اطلاعات فشار منفذی از نتایج ابزار آزمایش سازند[1] از عمق ۲۹۰۵ تا ۳۰۲۰ متری مخزن ایلام استفاده شد.

روش مطالعه

با توجـــه به اهمیت علوم زمین‌شناســـی، چاه‌پیمایی و ژئومکانیک مخزن در مطالعات مهندسی نفت، پژوهش حاضر با هدف انجام مطالعه‌ای جامع از علوم بیان‌شده بر روی سازند ایلام یکی از میادین جنوب غرب ایران در ســـه مرحله انجام پذیرفـــت. در مرحله اول، به زون‌بندی مخزن موردمطالعه از تلفیق زمین‌شناســـی و پتروفیزیک پرداخته شد. در مرحله دوم از موج اســـتونلی حاصل از نگاره صوتی دوقطبی برشی به تخمین تراوایی، از روش شـــاخص زون جریانی- استونلی[2] پرداخته شـــد و ســـپس برای بازه اصلی مخزن موردمطالعه (عمق ۲۹۴۰ تـــا ۳۰۰۰ متری) مـــدل ژئومکانیک یک‌بعدی ساخته شد. بدین منظور ضرایب الاستیک و مقاومتی سنگ، فشـــار منفذی، فشار روباره، مقدار و جهت تنش‌های برجا و پنجره ایمن وزن گل محاسبه و تعیین شدند.

زون‌بندی مخزن موردمطالعه به کمک نمودارهای چاه و مطالعات زمین‌شناسی

بعد از تعیین سرسازندهای مخزن موردمطالعه به کمک نمودارهـــای پتروفیزیکی معمول (چگالـــی، نوترون، صوتی و گامـــا) و داده‌های موجود از گزارش‌های زمین‌شناســـی، شناســـایی زون‌های مخزنی از غیرمخزنـــی اهمیت بالایی دارد. بـــرای انجام ایـــن مرحله از نمودارهـــای پتروفیزیکی مقاومت الکتریکی و نمودارهای ارزیابی‌شـــده (تخلخل مؤثر و اشباع‌شدگی) استفاده شد. درنهایت زون‌بندی انجام‌شده با اســـتفاده از داده‌های مهندسی مخزن صحت‌سنجی شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مخزن موردمطالعه به چهار زون تقسیم می‌شود که از بالا به پایین عبارتند از:

- زون ۱: بـــازه عمقـــی ۲۹۰۵ تا ۲۹۱۸ متری را شـــامل می‌شود، این زون مخزنی ضعیف با ضخامت کم است.
- زون ۲: عمـــق ۲۹۱۸ تـــا ۲۹۴۰ را در برمی‌گیرد. در این زون ستونی شش متری حاوی هیدروکربور وجود دارد.
- زون ۳: از عمـــق ۲۹۴۰ تـــا ۳۰۰۰ امتداد دارد. این زون مخزن اصلی در ســـاختمان میدان موردمطالعه اســـت و ۶۰ متـــر ضخامت دارد. در بالای مخزن یک ســـنگ آهک متراکم به همراه یک شـــیل است و در پایین آن، مخزنی کم‌وبیش ناتراوای آبدار قـــرار دارد. یک انتقال تدریجی کم‌وبیش در سنگ‌شناســـی توالی عمودی این مخزن مشاهده می‌شود. تغییر ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی در این زون برحســـب‌تصادف نیست و به نظر می‌رســـد پاسخی بر تغییرات عمودی اشباع آب در مخزن باشد. زون موردنظر به‌صورت بخشی دولومیتی شده و باعث کاهش تخلخل شده است. تخلخل در این زون قالب فسیلی[3] و قالب ماتریکس[4] (انحلال میکرایت) است. در بعضی عمق‌ها تخلخل‌های درون‌دانه‌ای (اولیه) و ریز شکســـتگی[5] مشاهده می‌شود. در حالت کلی زون موردنظر متخلخل است اما تراوایی پایینی دارد.
- زون ۴: از عمق ۳۰۰۰ تا ۳۰۲۰ چاه موردمطالعه را در بر دارد. لیتولـــوژی در بخش انتهایی مخزن تغییریافته که این باعث تضعیف ویژگی‌های پتروفیزیکی مخزن شـــده است. بر مبنای مطالعه مغزه‌های این چاه در این بازه، ندول‌های ســـنگ آهک بلورین سفید به فراوانی وجود دارد. این افزایش اشـــباع آب و کاهش تخلخل به نظر می‌رسد درنتیجه افزایش این قبیل ندول‌ها در این بازه باشد. این بخش به ســـبب ویژگی‌های ضعیف مخزنی دارای شرایط مخزنی نیست و یک سنگ آهک کم‌وبیش غیرتراوای آب‌دار است.

1. Modular Formation Dynamic Tester or MDT
2. Stoneley-Flow Zone Index
3. Fossil Moldic
4. Matrix Moldic
5. Microfracture

تخمین تراوایی از روش کالیبراسیون FZI-ST

به کمک موج استونلی می‌توان اطلاعات بسیار ارزشمندی از مخازن هیدروکربنی به دست آورد. موج استونلی حاصل از نمودار صوتی دوقطبی برشی یکی از دقیق‌ترین، مهم‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها برای تخمین تراوایی است و مزایای آن به نسبت دیگر روش‌ها صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌باشد. به کمک موج بیان‌شده می‌توان با ثبت ویژگی ذاتی موج استونلی و کمی کردن رابطه پارامترهای پتروفیزیکی این موج و تراوایی یک نمودار پیوسته، کامل و دقیق از روند تراوایی در سازند به دست آورد. تخمین تراوایی به‌صورت پیوسته، دقیق و منطبق بر شرایط مخزن از ویژگی‌های استفاده از موج استونلی می‌باشد (Winkler and Johnson، 1989؛ AL-Adani and Barati، 2003 and Wu and Yin، 2010). کبره گل، لیتولوژی و نوع سیال فاکتورهای اثرگذار بر روی کندی موج استونلی‌اند چراکه موج استونلی به‌واسطه مدول سیال نیز به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. یعنی چنانچه سیال از مایع به گاز تغییر کند تراوایی تخمین زده‌شده به‌شدت افزایش پیدا می‌کند (Al-Adani and Barati، 2003).

برای تخمین تراوایی از روش کالیبراسیون FZI-ST به یکسری موارد و پارامترها ازجمله کندی موج برشی، کندی موج استونلی[1]، کندی موج مذکور در زون ناتراوا[2]، تخلخل و تراوایی حاصل از آنالیز مغزه، تخلخل مؤثر و حجم کانی‌ها (حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی چاه)، چگالی و فاکتور شاخص تطابق برای کانی‌های سازنده لیتولوژی نیاز می‌باشد (Winkler and Johnson، 1989 and AL-Adani and Barati، 2003).

چون این موج به‌واسطه مدول بالک سیال و مدول برشی در فرکانس‌های پایین تحت تأثیر قرار می‌گیرد، کندی آن در بازه‌های ناتراوا به شرح زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\frac{1}{V_{st}} = \sqrt{\rho_f \left[\frac{1}{G} + \frac{1}{K_f}\right]} \qquad (1)$$

که در آن به ترتیب V_{st}، G، K_f و ρ_f نشان‌دهنده سرعت موج استونلی، مدول برشی سنگ، مدول بالک و چگالی سیال است. این معادله تنها در سازندهایی که سرعت موج استونلی فقط متأثر از خواص الاستیکی چاه و سازند است اعتبار دارد. با توجه به اینکه ابزار DSI به بررسی زون آغشته می‌پردازد، این ناحیه تحت تأثیر گل حفاری می‌باشد و منظور از سیال همان پالایه گل است.

رابطه ۱ با کمی تغییر به‌صورت رابطه کاربردی زیر در می‌آید.

$$DTST^2 = \frac{DTSM^2 * RHOM}{RHOB} + DTF^2 \qquad (2)$$

$$RHOB = \sum(RHO_i V_i) \qquad (3)$$

که در آن به ترتیب DTST، DTSM، DTF، RHOM، RHOB، RHO، V همان کندی موج استونلی، کندی موج برشی، کندی ظاهری پالایه گل، چگالی ظاهری پالایه گل، چگالی بالک، چگالی، حجم احتمالی و i سیال یا کانی می‌باشد. اگر نمودارمتقاطع $DTST^2$ در مقابل $\frac{DTST^2}{RHOB}$ را به‌صورت خطی در زون الاستیک یا ناتراوا رسم شود، شیب منحنی عبوری از داده‌ها نشان‌دهنده چگالی ظاهری پالایه گل است (Al-Adani and Barati، 2003).

با توجه به اثری که فضای متخلخل روی موج استونلی دارد می‌توان به محاسبه شاخص تراوایی پرداخت. این شاخص از نسبت کندی استونلی اندازه‌گیری شده به کندی مدل‌سازی شده (کندی محاسبه شده در زون ناتراوا) طبق رابطه ۴ می‌توان محاسبه کرد.

$$KIST = \frac{DTST}{DTSTE} \qquad (4)$$

در رابطه فوق KIST، DTST و DTSTE به ترتیب شاخص تراوایی استونلی، کندی موج استونلی در کل سازند و کندی موج استونلی در زون ناتراوا را نشان می‌دهد. به کمک این رابطه شاخص تراوایی سازند محاسبه می‌شود. شاخص تراوایی معیاری از تحرک‌پذیری و تراوایی نیست و در واقعیت نشان‌دهنده حرکت سیال در اطراف چاه است. از طرفی حرکت سیال تابع عواملی ازجمله اندازه، شکل و نحوه توزیع گلوگاه حفرات سازند است. بنابراین می‌توان

1. DTST
2. DTSTE

شـــاخص تراوایی را به‌عنوان شاخصی از پیچاپیچی دانست (Winkler and Johnson، 1989 and AL-Adani and Barati، 2003).

با توجه به رابطه پیچاپیچی و اندیس زون جریانی، در آخر شـــاخص زون جریان استونلی به شرح ذیل با FZI متناسب می‌شود.

$$FZI \propto \propto \propto KIST \quad (۵)$$

ازآنجایی‌که در زون ناتراوا شاخص تراوایی به سمت یک میل می‌کند فاکتور FZI نیز باید به ســـمت صفر میل کند و بالعکـــس. در تراوایی بی‌نهایت باید هر دو فاکتور KIST و FZI به سمت بی‌نهایت میل کنند، پس تناسب بیان‌شده به شکل زیر برقرار می‌شود:

$$FZI \propto (KIST - ۱) \quad (۶)$$

برای تبدیل این تناسب به‌تساوی، فاکتور شاخص تطابق به‌صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$FZI = IMF\ (KIST - ۱) \quad (۷)$$

فاکتور شـــاخص تطابق تنها عامل ارتباط بین شاخص تراوایی استونلی، شاخص زون جریانی و تراوایی واقعی برای کالیبراســـیون است و با توجه به حجم کانی‌های موجود در سازند به‌واسطه رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$IMF = \sum(IMF_i V_i) \quad (۸)$$

در این رابطه IMF[1] فاکتور شاخص تطابق، V_i حجم هر کانی و i معرف هر کانی می‌باشـــد. درنهایت بعد از محاسبه FZI، تراوایی استونلی در سازند موردمطالعه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = ۱۰۱۴ * FZI^۲ * \left[\frac{\emptyset^۳}{(۱-\emptyset)^۲}\right] \quad (۹)$$

در رابطـــه فـــوق K تراوایی اســـتونلی، φ تخلخل مؤثر (حاصـــل از خروجی ارزیابی پتروفیزیکی) و FZI اندیس زون جریانی می‌باشـــد. برای محاســـبه تراوایی از موج استونلی باید یک مرجـــع تراوایی نظیر؛ مغزه یا پروفایل تولیدی برای کالیبراسیون وجود داشته باشد (Winkler and Johnson، 1989؛ AL-Adani and Barati، 2003).

برای محاســـبه کندی موج اســـتونلی در زون ناتراوا دو روش به شرح ذیل وجود دارد:

الف) محاســـبه میانگین کندی این مـــوج در زون‌های ناتـــراوا: که در این پژوهش برای چاه موردمطالعه مقدار ۱۸۸ به دست آمد.

ب) رســـم نمودار متقاطع کندی موج استونلی در برابر تخلخل مؤثر: در این پژوهش از این روش مقدار ۱۸۷ به دســـت آمد که با توجه به‌دقت این روش نسبت به روش اول، ملاک عمل قرار گرفت (شکل ۱).

بعدازاینکه شاخص تراوایی استونلی از رابطه (۴) به دست آمد، با استفاده از روابط (۷) و (۸) و (۹) فاکتور شاخص تطابق (IMF)، برای کانی‌های غالب تشکیل‌دهنده‌ی سازند ایلام در چاه موردمطالعه به‌صورت مقادیر جدول (۱) تعیین شد.

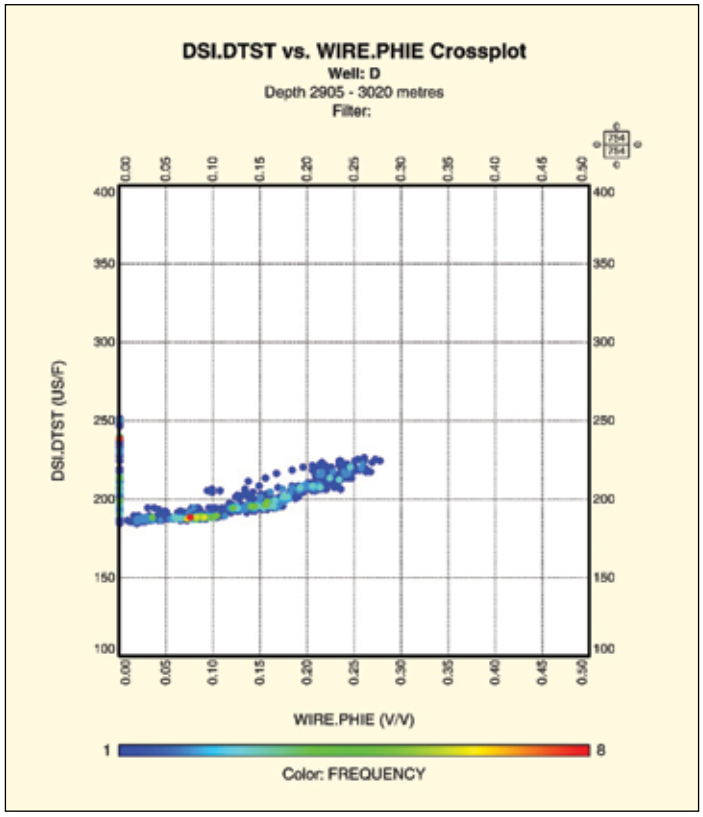
به این صورت که با قرار دادن تراوایی‌های مغزه در رابطه، مقادیر اندیس زون جریان (FZI) محاسبه می‌شود. در ادامه به کمک رابطه فاکتور شـــاخص تطابق کل برای عمق‌های مختلف در ســـازند موردمطالعه به دست می‌آید. به‌گونه‌ای که بهترین تطابق بین تراوایی و شاخص تراوایی برقرار شود. شـــکل ۲ ضریـــب همبســـتگی (R^2=۰/۹۰) تراوایی تخمین زده‌شده با روش FZI- استونلی را در مقابل تراوایی حاصل از آنالیز مغزه در چاه موردمطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱ فاکتور شـــاخص تطابق محاسبه شـــده برای کانی‌های تشکیل‌دهنده سازند موردمطالعه

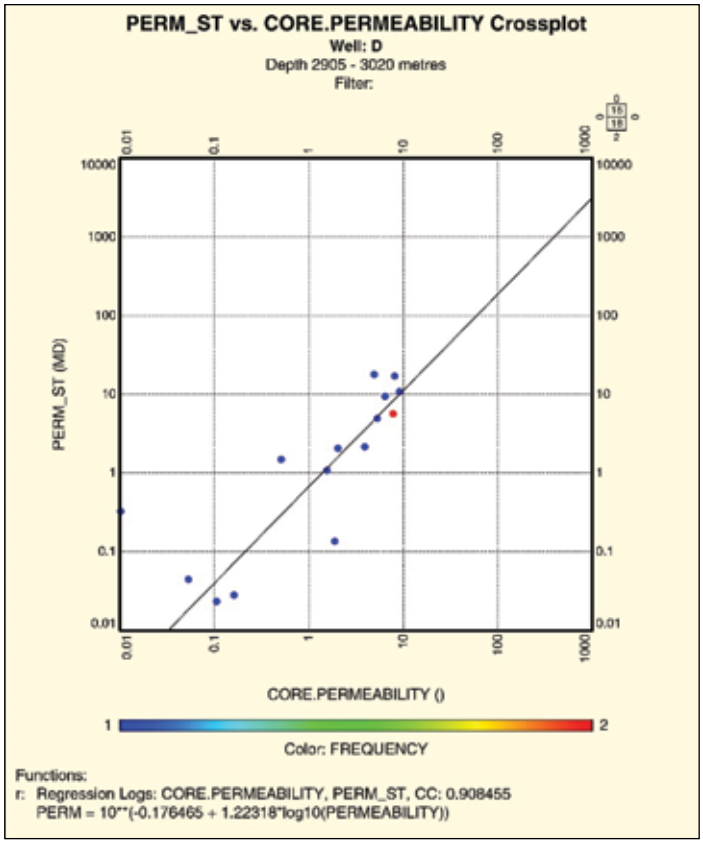
نوع کانی‌ها	شیل	کلسیت	دولومیت
فاکتورشاخص تطابق	۰	۷/۶۴	۱/۱۲

شکل ۳ ستون اول از چپ مربوط به نمودارهای گاما، کالیپر و اندازه مته، ستون دوم مجموعه کامل نمودارهای مقاومت، ســـتون ســـوم نمودارهای صوتی، نوترون، دانسیته به همراه فوتوالکتریک، ستون چهارم موج استونلی، ستون پنجم عمق، ستون ششم لیتولوژی، ستون هفتم حجم آب و نفت، ستون هشتم تخلخل لاگ و ستون نهم تراوایی تخمین زده‌شده با روش کالیبراسیون FZI- استونلی (نمودار پیوسته مشکی رنگ) در مقابل تراوایی حاصل از آنالیز مغزه (نقاط آبی) را نشان می‌دهد.

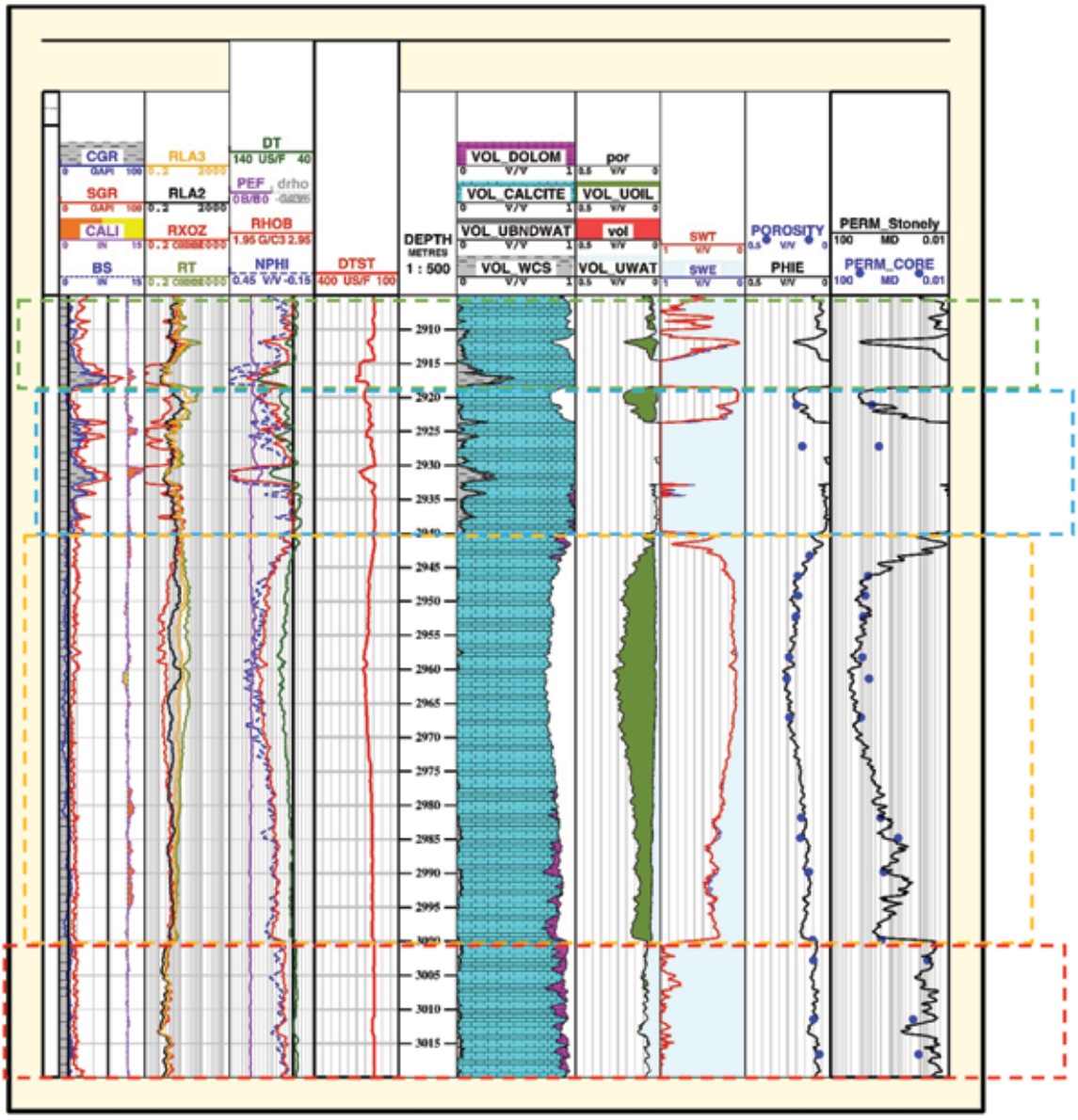
1. Index matching factor



شکل ۱. نمودار متقاطع کندی موج استونلی در برابر تخلخل مؤثر برای سازند ایلام چاه موردمطالعه



شکل ۲. ضریب همبستگی بین تراوایی مغزه و تراوایی تخمین زده‌شده از روش FZI- استونلی در چاه موردمطالعه (R^2=۰/۹۰).



شـــکل ۳. نمودارهای مرســـوم چاه موردمطالعه، موج استونلی و تراوایی تخمین زده‌شده نشـــان داده شده است (ستون اول از چپ مربوط به نمودارهای گاما، کالیپر و اندازه مته، ستون دوم مجموعه کامل نمودارهای مقاومت، ستون سوم نمودارهای صوتی، نوترون، دانسیته به همراه فوتوالکتریک، ستون چهارم موج استونلی، ستون پنجم عمق، ستون ششم لیتولوژی، ستون هفتم حجم آب و نفت، ستون هشتم تخلخل لاگ و ســـتون نهم تراوایی تخمین زده‌شـــده با روش کالیبراسیون FZI استونلی (نمودار پیوسته مشکی رنگ) در مقابل تراوایی حاصل از آنالیز مغزه (نقاط آبی) نشان می‌دهد. همبستگی تراوایی تخمین زده‌شده با تراوایی مغزه درروش FZI- استونلی (R^2= ۰/۹۰) به دست آمد

ساخت مدل ژئومکانیکی برای بازه تولیدی و مخزن اصلی چاه موردمطالعه

ســـاخت مدل یک‌بعدی چاه قبـــل از حفاری از اهمیت بالایی برخوردار اســـت چراکه بر اساس آن می‌توان در زمینه پایدارســـازی دیواره چاه تحت چگالی مشـــخصی از سیال حفاری، با در نظر گرفتن شرایط ژئومکانیکی محدوده مورد بررســـی، تصمیم‌گیری کرد. برای ســـاخت مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی ابتدا، ضرایب الاستیک دینامیکی سازند براساس نمودارهای پتروفیزیکی تعیین می‌شوند. سپس با استفاده از روابط موجود بین خواص دینامیکی و اســـتاتیکی، ضرایب

الاســـتیک استاتیکی سازند محاســـبه و سپس پارامترهای مقاومتی سنگ، نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری سه محوری محصورشـــده، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششـــی براســـاس روابط توســـعه داده شده از مطالعات آزمایشـــگاهی تعیین می‌شوند. در گام بعدی فشار منفذی و تنش‌های برجا تخمین زده می‌شوند و با استفاده از آزمایش‌های درون‌چاهی کالیبره خواهند شد. در گام نهایی براساس تنش‌های القایی ایجادشده در زمان حفاری، پنجره ایمن وزن گل با اســـتفاده از معیار شکســـت سنگ تعیین می‌شود. با تنظیم مقادیر کرنش در جهت‌های افقی می‌توان پنجره ایمن گل را بـــا رویدادهای درون‌چاهی منطبق نمود (Mohiuddin et al., 2001).

محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ

محاســـبه و تخمین ضرایب الاستیک و مقاومت سنگی را می‌توان مبنـــای مطالعات ژئومکانیک مخازن دانســـت (Al-Qahtani and Zillur, 2001). چراکه با دانستن آن‌ها می‌توان به برخی از پارامترهای متغیر در مخزن نظیر فشـــار پی برد. همچنین با محاســـبه ضرایب الاســـتیک وضعیت همســـانگردی و ناهمســـانگردی را می‌تـــوان مطالعه کرد. بعلاوه دانســـتن ضرایب الاستیک از اصول اولیه محاسبات ژئومکانیک مخزن است. البته برای به دست آوردن ضرایب الاستیک سنگ‌ها، دانستن ســـرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی در مخزن لازم است و اطلاع از سرعت موج برشی نیاز به دســـتگاه‌های مدرن با هزینه بالایی دارد و همچنین اســـتفاده از آن‌ها در تمامـــی چاه‌ها امکان‌پذیر نیست. نمودار ســـرعت موج برشی و سرعت موج فشارشی از پارامترهای اساســـی در محاسبات مخازن هیدروکربوری هســـتند و با ترکیب این دو نمودار با نمودار چگالی می‌توان ثابت‌های الاستیک سنگ مخزن را محاسبه کرد. ازآنجایی که ســـرعت موج برشـــی از پارامترهای مختلف سنگ نظیر سرعت موج فشـــاری، سیال منفذی و غیره تأثیر می‌پذیرد، می‌تواند بیانگر ویژگی‌های فیزیکی سنگ نیز باشد. ازاین‌رو، سرعت موج برشـــی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، سیال منفذی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند نظیر مدول برشـــی، مدول حجمی و غیره کاربرد دارد. اما نمودار موج برشی با ابزارهای متداول اندازه‌گیری ویژگی‌های مخزنی قابل برداشت نمی‌باشد. درنتیجه اطلاعات این نمودار در تمامی چاه‌ها در دســـترس نیســـت. یکی از ابزارهایی که اطلاعات موج برشی را به‌صورت پیوسته در اختیار قرار می‌دهد، ثبت موج کامل به‌وســـیله ابزار صوتی دوقطبی برشی است. ابزار مذکور هر دو موج برشی و فشارشی را برداشت می‌کند. برای محاسبه پارامترهای مذکور در چاه موردمطالعه از روابط زیر استفاده شد (Al-Qahtani and Zillur, 2001).

(۱۰) ضریب پواسون $$\nu_{\mathrm{d}} = \frac{(V_P^2 - 2V_S^2)}{2(V_P^2 - V_S^2)}$$

(۱۱) ضریب یانگ دینامیک $$E_{\mathrm{d}} = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2}$$

(۱۲) ضریب برشی $$\mathrm{G} = \rho_b * V_S^2$$

(۱۳) ضریب حجمی $$K_{\mathrm{d}} = \frac{E_{dyn}}{3(1-2\upsilon)}$$

(۱۴) ضریب یانگ استاتیک $$E_s = 0.7 * \mathrm{E}$$

(۱۵) نسبت پواسون $$\upsilon_{\mathrm{s}} = \upsilon_{\mathrm{d}}$$

(۱۶) ضریب برشی استاتیک $$G_{\mathrm{s}} = \frac{E_s}{2(1+\upsilon)}$$

(۱۷) ضریب حجمی استاتیک $$K_{\mathrm{s}} = \frac{E_s}{3(1-2\upsilon)}$$

E_d ضریب یانگ دینامیک، ρ چگالی، V_s ســـرعت موج برشی، V_p سرعت موج فشاری، ν ضریب پواسون، G ضریب برشی و K ضریب حجمی است.

پارامترهای مقاومتی ســـنگ شـــامل مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت کششی (T) و زاویه اصطکاک داخلی سنگ (Ø) می‌باشـــند. برای به دست آوردن نمودار پیوسته‌ای از مقاومت فشاری تک‌محوری نیز باید از رابطه‌ی تجربی حاصل از آزمایشگاه استفاده کرد. این رابطه را می‌توان از رسم منحنی مربوط به مقادیر UCS در مقابل تخلخل یا

ضریب یانگ اســـتاتیک برقرار کرد. در این پژوهش به دلیل کربناته بودن مخزن موردمطالعه، از رابطه ۱۸ استفاده شد.

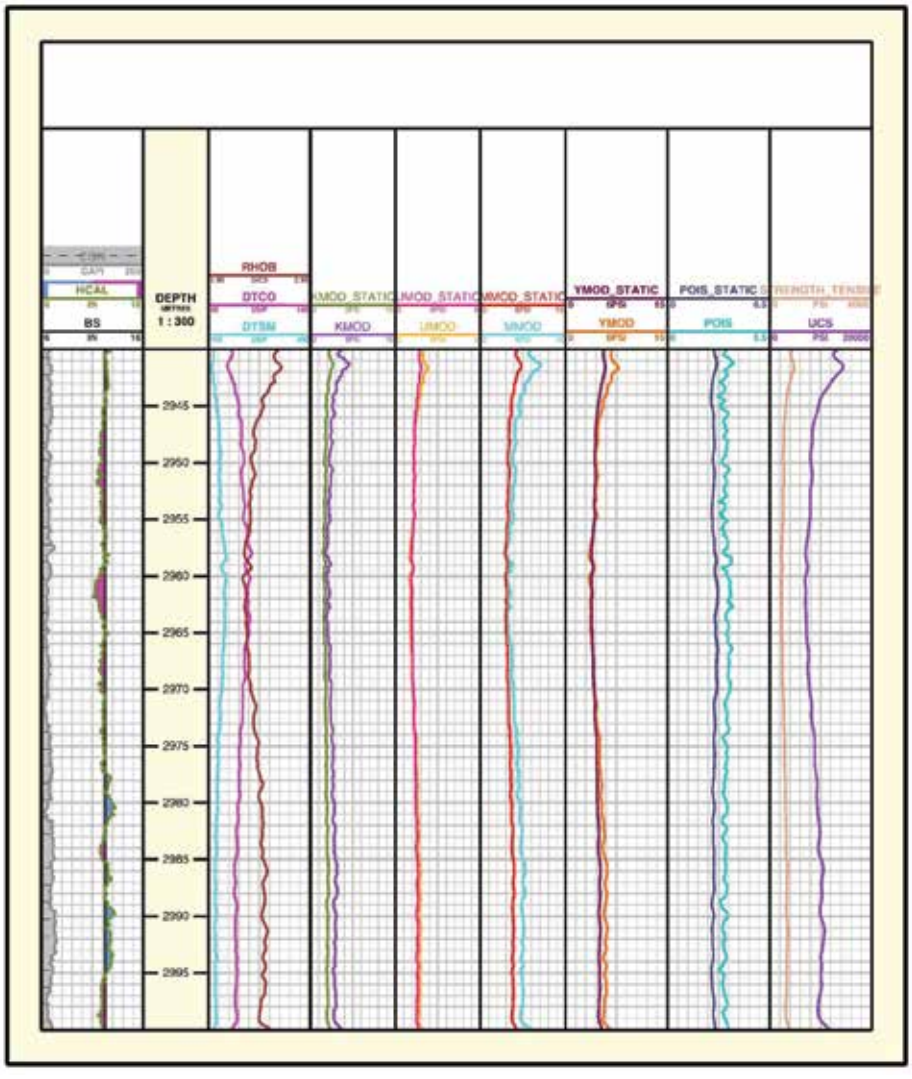
$$UCS = ۲.۶۵ \times \left(E_{sta}^{\ ۰.۸} \ / \ \varphi_e^{\ ۰.۲}\right) \quad (۱۸)$$

که در آن UCS مقاومت فشاری تک‌محوری، E_{sta} مدول یانگ اســـتاتیک و φ_e تخلخل مؤثر توالی مخزن می‌باشـــد. مقاومت کششی سنگ[1] بر طبق نوع سازند غالباً در حدود $\frac{۱}{۱۲}$ تا $\frac{۱}{۸}$ مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) است. برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی ســـنگ (ϕ) از رابطه پلامب[2] استفاده می‌شـــود. تخلخل حاصل از نمودار نوترون[3] و حجم شـــیل متغیرهای این معادله هستند (Gholami et al., 2015).

$$\phi = ۲۶.۵ - ۳۷.۴(۱ - NPHI - V_{shale}) + ۶۲.۱(۱ - NPHI - V_{shale})^۲ \quad (۱۹)$$

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (۲۰)$$

درنهایت پارامترهای الاستیک و مقاومتی زون تولیدی چاه موردمطالعه محاســـبه شد (شـــکل ۴). تغییر مقادیر محاسبه شده در این پارامترها به‌طور کامل با تغییرات ستون سنگ‌شناسی و مقدار تخلخل سنگ منطبق است.



شکل ۴. پارامترهای الاستیک و مقاومتی محاسبه شده در زون تولیدی مخزن موردمطالعه

1. Tensile Strength
2. Plumb
3. NPHI

محاسبه فشار روباره و منفذی

در فضای متخلخل، قسمتی از فشار لایه‌های روباره توسط سیال منفذی تحمل می‌شود و سیال نیز متناسب با آن بار، فشاری را به دیواره منفذ وارد می‌کند که با عنوان فشار منفذی شناخته می‌شود (Ammarloo et al., 2025). فشار منفذی یکی از کمیت‌های مهم در مطالعات ژئومکانیکی است و اطلاع از مقدار آن در نقاط مختلف میدان، باعث کاهش چشمگیر خطرات حفاری، بهبود طراحی مسیر چاه، طراحی وزن گل مناسب و همچنین تعیین نقاط نصب لوله جداری در چاه می‌شود. در زون تولیدی موردمطالعه اطلاعات فشار منفذی از نتایج ابزار آزمایش سازند (MDT) در پنج نقطه در دسترس بود که از گرادیان نقاط فشار منفذی موجود، نمودار فشار منفذی در سازند مورد پژوهش محاسبه شد (شکل ۵).

تعیین مقادیر تنش‌ها

تنش‌های برجا دارای سه مولفه اصلی تنش قائم (σ_v)، تنش افقی کمینه (σ_h) و تنش افقی بیشینه (σ_H) می‌باشند (Ammarloo et al., 2025). از میان مولفه‌های بیان‌شده، تنش قائم را می‌توان با داشتن چگالی (ρ) سنگ‌های روباره برای هر عمقی در سازند به کمک رابطه ۲۱ به دست آورد. تنش قائم عبارت است از فشار واردشده از سمت وزن طبقات و سیالات لایه‌های رویی بر سازندی در عمق معین که با حاصل جمع وزن مخصوص سنگ‌های رویی در ضخامت هر لایه به دست می‌آید. چگالی سازند را می‌توان از لاگ چگالی مشخص کرد، اما با توجه به اینکه برای بخش‌های بالای مخزن به‌طورکلی از نظر اصولی این نمودار برداشت نمی‌شود. بنابراین، روش‌های زیادی برای تخمین چگالی و یا تنش روباره توسط متخصصین ارائه شده است. در پژوهش حاضر از رابطه ۲۲ برای تخمین تنش قائم به کمک پارامترهای تخلخل (ϕ)، چگالی ماتریکس (ρ_{ma})، عمق (z) و چگالی سیال منفذی (ρ_f) استفاده شد. مقادیر تنش افقی کمینه (σ_h) و تنش افقی بیشینه (σ_H) نیز از رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ محاسبه شدند.

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z)\, dz + P_0 \qquad (۲۱)$$

$$\sigma_v = 0.433[(1-\phi)\rho_{ma} + \rho_f \phi] \times z \qquad (۲۲)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \qquad (۲۳)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \qquad (۲۴)$$

همان‌گونه که بیان شد با انجام عملیات حفاری، توزیع و همچنین مقدار تنش برجا از حالت اولیه تغییر کرده و در اطراف چاه دچار اغتشاش می‌شود. یکی از روش‌های مهم تعیین جهت تنش‌های افقی، استفاده از تصویر برداشت شده از دیواره چاه توسط نمودار تصویرگر FMI است. به کمک تصویر تولیدی از این ابزار می‌توان عوارض موجود روی دیواره چاه و جهت قرارگیری آن‌ها را مشخص کرد. یکی از عوارض موجود روی دیواره چاه، ریختگی‌هایی است که در جهت تنش افقی حداقل رخ می‌دهند. ریختگی‌های دیواره چاه با نام Breakout شناخته می‌شوند. همچنین غالباً شکستگی‌هایی نیز در جهت عمود بر این ریختگی پدیدار شده که در جهت تنش افقی حداکثر قرار دارند و با نام Induced Fracture شناخته می‌شوند. در پژوهش حاضر از دو روش نمودار FMI و نمودار قطرسنج[1] برای تعیین ریزش‌های دیواره چاه استفاده شد. در زون موردمطالعه به کمک نمودارهای FMI و Caliper ابتدا ریختگی‌ها تعیین و سپس جهت ریزش‌ها مشخص و در ادامه جهت تنش حداقل به دست آمد و بر اساس آن نیز جهت تنش حداکثر تعیین شد (شکل ۵). بر همین اساس جهت تنش حداقل و حداکثر در چاه موردمطالعه به ترتیب S34E و N56E به دست آمد.

تنش‌های القایی

در زمان حفر چاه، میزان باری به سنگ‌های اطراف چاه اعمال می‌شود. این موضوع باعث تمرکز تنش در اطراف چاه می‌گردد. این تمرکز تنش درنهایت موجب ناپایداری چاه و

1. Caliper

به دنبال آن هزینه‌های گزافی است. تمرکز تنش در نواحی اطراف چاه با مولفه‌های تنش مماسی (σ_θ)، شعاعی (σ_r) و محوری (σ_z) مشخص می‌شوند. برای سنگ‌های الاستیک همسانگرد و ایزوتروپیک، تنش‌های القایی اطراف چاه به‌وسیله روابط ۲۵ تا ۲۷ محاسبه می‌شود.

$$\sigma_r = \frac{۱}{۲}(\sigma_H + \sigma_h)\left(۱ - \frac{a^۲}{r^۲}\right) + \frac{۱}{۲}(\sigma_H - \sigma_h)$$
$$\left(۱ - ٤\frac{a^۲}{r^۲} + ۳\frac{a^٤}{r^٤}\right)cos۲\theta + \frac{a^۲}{r^۲}P_w \quad (۲۵)$$

$$\sigma_\theta = \frac{۱}{۲}(\sigma_h + \sigma_H)\left(۱ + \frac{a^۲}{r^۲}\right) - \frac{۱}{۲}(\sigma_H - \sigma_h)$$
$$\left(۱ + ۳\frac{a^٤}{r^٤}\right)cos۲\theta - \frac{a^۲}{r^۲}P_w \quad (۲۶)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - ۲\nu(\sigma_H - \sigma_h)\frac{a^۲}{r^۲}cos۲\theta \quad (۲۷)$$

روابط بیان‌شده برای محاسبه تنش‌های القایی در نقطه‌ای به فاصله r از مرکز چاهی با شعاع a است و فشار سیال درون آن برابر P_w است. زاویه θ برای تعیین موقعیت نقطه در مختصات قطبی نسبت به جهت σ_H به‌صورت ساعت‌گرد است. با عنایت به این‌که در مباحث ناپایداری دیواره چاه مقادیر بحرانی تنش‌های القایی حائز اهمیت است، بنابراین مقادیر کمینه و بیشینه هر یک از این تنش‌های القایی در اطراف دیواره چاه مشخص می‌شود. درنتیجه با استفاده از روابط پروالاستیک (Kidambi and Kumar، 2016)، مقادیر تنش افقی حداقل و حداکثر محاسبه شدند (شکل ۵).

ساخت مدل ژئومکانیک و تعیین پنجره ایمن وزن گل

وزن گل حفاری را می‌توان مهم‌ترین عامل در پایداری چاه دانست. وزن مطمئن و ایمن گل حفاری گستره‌ای از تغییرات وزن گل حفاری است و اگر کم‌تر از آن باشد، موجب شکستگی برشی و چنانچه بیش‌تر از آن باشد سبب شکستگی کششی در دیواره چاه می‌شود. برای تعیین پنجره ایمن وزن گل نیاز است از معیارهای شکست سنگ استفاده شود، سپس نتایج این بخش با نمودارهای تصویرگر FMI و کالیپر و همچنین هرزروی سیال چاه مقایسه شود. با عنایت بر اینکه یکی از پرکاربردترین معیارهای شکست برشی سنگ، معیار شکست موهر-کلمب (این معیار با در نظر گرفتن مقادیر تنش‌های حداکثر و حداقل و با چشم‌پوشی از تأثیر تنش متوسط به پیش‌بینی شرایط شکست می‌پردازد) است، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (Al-Ajmi، 2006). رابطه کلی این معیار به‌صورت زیر است:

$$\sigma_۱ = C_۰ + q\sigma_۳ \quad (۲۸)$$

در این رابطه $C_۰$ مقاومت فشاری تک‌محوری است. همچنین مقدار q از رابطه ۲۹ به دست می‌آید.

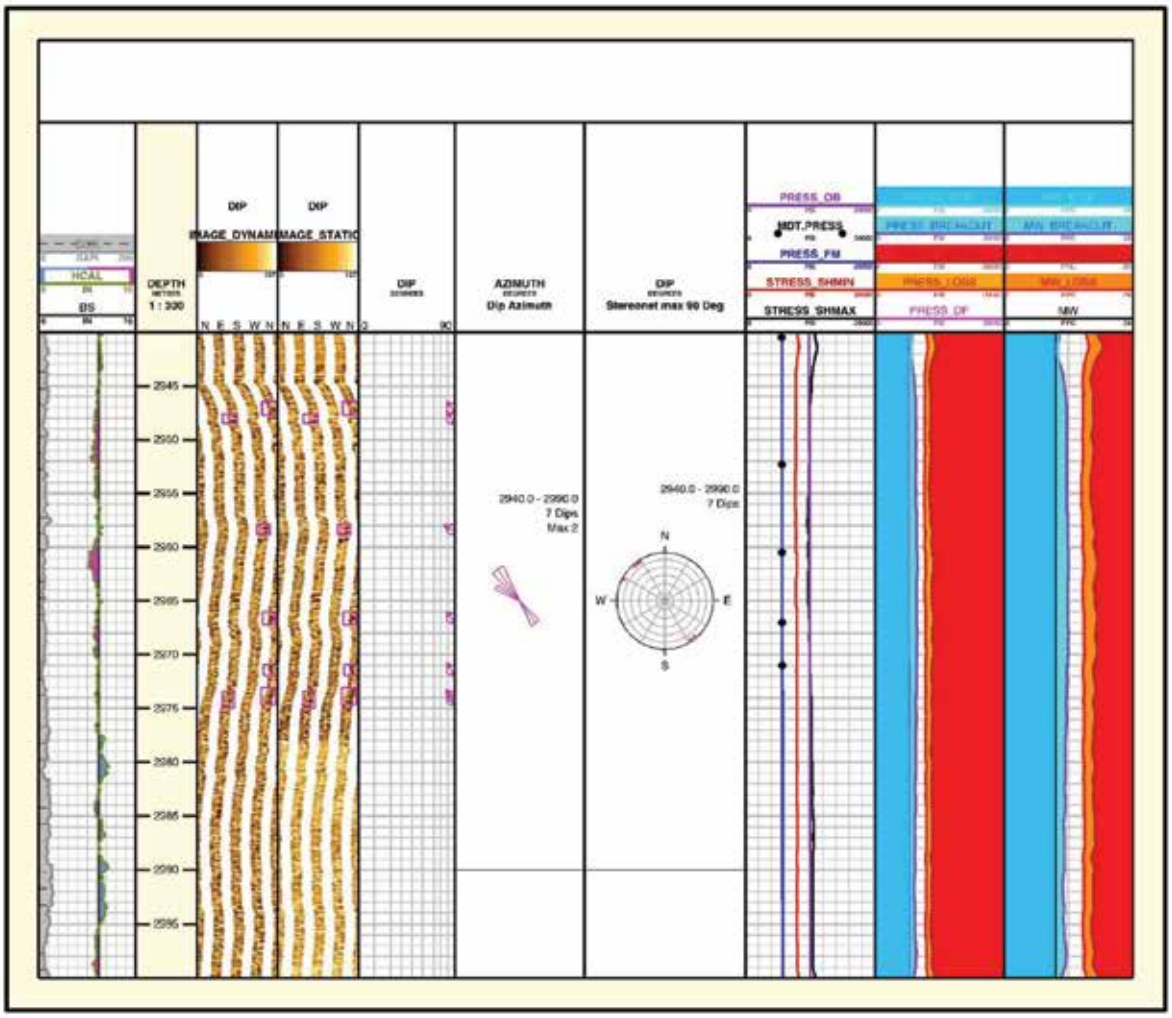
$$q = \frac{۱ + \sin\varphi}{۱ - \sin\varphi} \quad (۲۹)$$

φ در رابطه بیان‌شده زاویه اصطکاک داخلی سنگ است. برای مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری رابطه ۳۰ برقرار است.

$$C_۰ = \sigma_c = \frac{۲C\cos\varphi}{۱ - \sin\varphi} \quad (۳۰)$$

C در رابطه فوق چسبندگی سنگ می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین خروجی‌های آنالیز پایداری مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی، معرفی پنجره ایمن گل حفاری است. در این پنجره چهار مرز ناپایداری (مرز فشار سازندی، مرز پایین وزن گل، مرز بالای وزن گل، مرز فشار شکست سازند) برای دیواره چاه بر اساس وزن گل انتخابی وجود دارد (Manshad et al.، 2014). بر مبنای مدل ساخته‌شده، بازه‌های دارای Breakout با نتایج مدل مطابقت دارد. وزن گل اعمال‌شده در این چاه کمی کمتر از پنجره ایمن گل و منطبق با فشار منفذی است. پنجره ایمن گل برای حالت قائم در زون مورد بررسی بین ۱۲/۲ تا ۱۵/۵ (LB/G)، آزیموت بهینه از راستای عمودی با آزیموت N120 درجه و انحراف ۸۰-۹۰ درجه است. حداقل وزن بهینه در این راستا بر اساس فشار و وزن گل معادل آن به ترتیب ۵۹۹۶/۷ (psi) و ۱۱/۸ (LB/G) محاسبه و رژیم گسلش در چاه موردمطالعه، با توجه به مقادیر تنش‌های افقی و عمودی از نوع نرمال-امتدادلغز می‌باشد. در شکل ۵ مدل ژئومکانیکی ساخته‌شده برای بازه تولیدی مخزن موردمطالعه نشان داده شده است.



شکل ۵. ساخت مدل ژئومکانیکی برای بازه تولیدی موردمطالعه

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف انجام مطالعه‌ای جامع به زون‌بندی مخزن موردمطالعه از تلفیق زمین‌شناسی و پتروفیزیک، محاسبه تراوایی از نمودار صوتی دوقطبی برشی و درنهایت ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی پرداخته شد. بر مبنای زون‌بندی انجام‌شده مخزن موردمطالعه به چهار زون تقسیم‌بندی شد، که زون اصلی تولیدکننده در چاه موردمطالعه در عمق ۲۹۴۰ تا ۳۰۰۰ متری (زون سه) قرار دارد. این زون مخزن اصلی در ساختمان میدان موردمطالعه است و ۶۰ متر ضخامت دارد. در بالای مخزن یک سنگ آهک متراکم به همراه یک شیل است و در پایین آن، مخزنی کم‌وبیش ناتراوای آبدار قرار دارد. یک انتقال تدریجی کم‌وبیش در سنگ‌شناسی توالی عمودی این مخزن مشاهده می‌شود. تغییر ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی در این زون برحسب‌تصادف نیست و به نظر می‌رسد پاسخی بر تغییرات عمودی اشباع آب در مخزن باشد. زون موردنظر به‌صورت بخشی دولومیتی شده و باعث کاهش تخلخل شده است. تخلخل در این زون قالب فسیلی و قالب ماتریکس (انحلال میکرایت) دارد که در بعضی عمق‌ها تخلخل‌های درون‌دانه‌ای (اولیه) و ریز شکستگی مشاهده می‌شود. در حالت کلی زون موردنظر متخلخل است اما تراوایی پایینی دارد. در زون انتهایی سازند موردمطالعه لیتولوژی تغییریافته و این باعث تضعیف ویژگی‌های پتروفیزیکی مخزن شده است. بر مبنای مطالعه مغزه‌های این چاه در این بازه، ندول‌های سنگ آهک بلورین سفید به فراوانی وجود دارد که این

افزایش اشباع آب و کاهش تخلخل به نظر می‌رسد درنتیجه افزایش این قبیل ندول‌ها در این بازه باشد. این بخش به سبب خواص ضعیف مخزنی دارای ویژگی‌های مخزنی نمی‌باشد و یک سنگ آهک تقریبا غیرتراوای آب‌دار است. در مرحله دوم با توجه بر دقت بسیار بالای موج استونلی حاصل از نگاره صوتی دوقطبی برشی (DSI) در تخمین تراوایی، از روش شاخص زون جریانی-استونلی Stoneley-Flow Zone Index (ST-FZI) برای محاسبه این پارامتر حساس و حیاتی بهره گرفته شد. ضریب همبستگی تراوایی تخمین زده‌شده با تراوایی مغزه درروش FZI- استونلی (R^2= ۰/۹۰) به دست آمد. در مرحله سوم برای بازه اصلی مخزن موردمطالعه (عمق ۲۹۴۰ تا ۳۰۰۰ متری) مدل ژئومکانیک یک‌بعدی ساخته شد. بر همین اساس جهت تنش حداقل و حداکثر در چاه موردمطالعه به ترتیب S34E و N56E به دست آمد. معیار شکست مورد استفاده در ساخت مدل چاه بیان‌شده معیار شکست موهر-کلمب است. بر مبنای مدل ساخته‌شده، بازه‌های دارای Breakout با نتایج مدل مطابقت دارد و وزن گل اعمال‌شده در این چاه کمی کمتر از پنجره ایمن گل و منطبق با فشار منفذی است. پنجره ایمن گل برای حالت قائم در زون مورد بررسی بین ۱۲/۲ تا ۱۵/۵ (LB/G)، آزیموت بهینه از راستای عمودی با آزیموت N120 درجه و انحراف ۸۰-۹۰ درجه است. حداقل وزن بهینه در این راستا بر اساس فشار و وزن گل معادل آن به ترتیب ۵۹۹۶/۷ (psi) و ۱۱/۸ (LB/G) محاسبه و رژیم گسلش در چاه موردمطالعه، با توجه به مقادیر تنش‌های افقی و عمودی از نوع نرمال-امتدادلغز می‌باشد.

منابع

- اعتمادی‌کرمانی، ب. و آبدیده، م.، ۱۳۹۵. تخمین تراوایی در مخازن کربناته توسط نمودار درون‌چاهی برشی صوتی، اولین کنفرانس بین‌المللی جامع علوم مهندسی در ایران، ۱۳-۱.
- توکلی، و.، ۱۳۹۹. تأثیر تراوایی بر کاهش سرعت موج استونلی: راستی‌آزمایی یک انگاره در مخازن کربناته خلیج‌فارس، بیست و سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۳-۱.
- خیر، ک.، مرادزاده، ع. و تخمچی، ب.، ۱۳۹۴. بهبود روش‌های تعیین پارامترهای محاسبه تراوایی مخازن کربناته با استفاده از امواج استونلی، پژوهش نفت، شماره ۸۹، ۱۷۴-۱۶۵.
- رضایی، م. ر. و چهرازی، ع.، ۱۳۸۹. اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، ۷۲۲.
- سعادت‌زاده، ا. و عصاریان، س.، ۱۴۰۱. تعیین نوع سنگ و تخمین تراوایی با به‌کارگیری آنالیز نگارهای چاه‌پیمایی با استفاده از تکنیک شاخص ناحیه جریانی در یک مخزن نفتی کربناته در جنوب غربی ایران، اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۲۰۶، ۱۰-۴.
- Al-Adani, N. and Barati, A., 2003. September. new hydraulic unit permeability approach with DSI. In SPWLA 9th Formation Evaluation Symposium, Japan, 25-56.
- Ammarloo, H., Zoughy, P., Mehraban, L. F. and Amiri, M., 2025. Evaluation of empirical relationships in carbonates by developing a 1D mechanical earth model in an oil field in Southwestern Iran. Results in Engineering, 26, 104799.
- Abalioglu, I., Legarre, H., Garland, C., Sallier, B., Gao, J., van Galen, M., Chou, Q., Neil, B., Soroush, H., Qutob, H. and Mahli, Z., 2011. The Role of Geomechanics in Diagnosing Drilling Hazards and Providing Solutions to the Northern Iraq Fields. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, (142022).
- Al-Qahtani, M.Y. and Zillur, R., 2001. A mathematical algorithm for modeling geomechanical rock properties of the Khuff and Pre-Khuff reservoirs in Ghawar field. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, (68194).
- Al-Ajmi, A., 2006. Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion (Doctoral dissertation, KTH).
- Brie, A., Endo, T., Johnson, D.L. and Pampuri, F., 1998. September. Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves. In SPE Annual Technical Conference and

Exhibition, 109-117.

- Ezati, M., Azizzadeh, M., Riahi, M.A., Fattahpour, V. and Honarmand, J., 2020. Wellbore stability analysis using integrated geomechanical modeling: a case study from the Sarvak reservoir in one of the SW Iranian oil fields. Arabian Journal of Geosciences, 13,1-19.

- Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., Hanachi, J., 2014. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. Rock Mech. Geotech. Eng. 6, 13-25.

- Jamalian, M., Safari, H. and Goodarzi, M., 2018. June. Permeability Prediction Using Artificial Neural Network and Least Square Support Vector Machine Methods. In 80th EAGE Conference and Exhibition, 2018.

- James, G.A. and Wynd, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. AAPG bulletin, 49(12),2182-2245.

- Kidambi, T. and Kumar, G.S., 2016. Mechanical earth modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. Journal of Petroleum Science and Engineering, 141, 38-51.

- Manshad, A.K., Jalalifar, H. and Aslannejad, M., 2014. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 4, 359-369.

- Mohiuddin, M.A., Awal, M.R., Abdulraheem, A. and Khan, K., 2001. March. A new diagnostic approach to identify the causes of borehole instability problems in an offshore Arabian field. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, (pp. SPE-68095).

- Rafik, B. and Kamel, B., 2017. Prediction of permeability and porosity from well log data using the nonparametric regression with multivariate analysis and neural network, Hassi R'Mel Field, Algeria. Egyptian journal of petroleum, 26(3), 763-778.

- Soleimani, B., Moradi, M. and Ghabeishavi, A., 2018. Stoneley wave predicted permeability and electrofacies correlation in the Bangestan Reservoir, Mansouri Oilfield, SW Iran. Geofísica internacional, 57(2), 107-120.

- Winkler, K.W., Liu, H.L. and Johnson, D.L., 1989. Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiment and theory. Geophysics, 54(1), 66-75.

- Wu, X. and Yin, H., ExxonMobil Upstream Research Co, 2010. Method for determining reservoir permeability form borehole Stoneley-wave attenuation using Biot's poroelastic theory. U.S. Patent 7,830,744.

- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R.N., 1985. Well bore breakouts and in situ stress. J. Geophys. Res. Solid Earth, 90, 5523-5530.